



Aalborg Universitet

AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

Triaxialforsøg på sand

Jacobsen, H. Moust ; Poulsen, H. Serup

Published in:
NGM 79

Publication date:
1979

Document Version
Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

Citation for published version (APA):

Jacobsen, H. M., & Poulsen, H. S. (1979). Triaxialforsøg på sand. I *NGM 79: Helsingfors 1979*

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at vbn@aub.aau.dk providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

TRIAXIALFORSØG PÅ SAND

H. Moust Jacobsen, lic. techn.
H. Serup Poulsen, akademiingeniør
Aalborg Universitetscenter
Danmark

RESUME

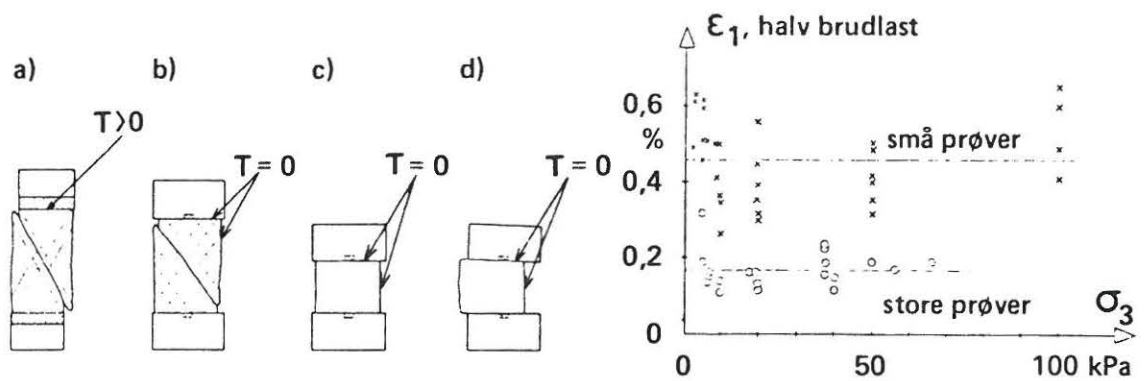
Artiklen er en fortsættelse af artiklen ved Nordisk Geoteknikermøde i København om »sands styrke«, men omhandler udelukkende triaxialforsøg. Prøvens spændings- og tøjnings-tilstand analyseres og nødvendigheden af en homogen tilstand i brud fremhæves. Der analyseres en række resultater på samme sand for at finde frem til hensigtsmæssige prøvedimensioner. Endvidere sammenlignes resultaterne af en række forsøg på forskellige sandsorter og der opstilles en simpel skønsformel, der formodes at kunne anvendes til alle slags sand. Der omtales også udrænedede forsøg på sand, der giver en billigere måling af friktionsvinklen end de normale drænedede forsøg. Endelig omtales indflydelse af spændingsniveauet på tolkningen af **modelforsøg**.

1. INDLEDNING

I laboratoriet kan jords styrkeegenskaber bestemmes i triaxialapparatet. Der anvendes cylindriske prøver underkastet en axialsymmetrisk spændingstilstand. Resultatet af forsøgene benyttes herefter til brudberegninger i jord på plasticitetsteoretisk grundlag, eventuelt med korrektion for plan spændingstilstand.

Triaxialforsøgene kan endvidere benyttes til sætningsberegninger på ler (Skempton og Bjerrum 1957), på moræneler (Moust Jacobsen 1970) og er også søgt benyttet til vurdering af sætninger på sand (Brinch Hansen 1966).

Forsøgsteknikkens udvikling er skitseret på figur 1. Ved den traditionelle metode anvendes en prøve, hvis højde er dobbelt så stor som diameteren. Den er placeret mellem to trykhoveder, der er porøse over hele fladen af hensyn til dræning af prøven. Trykhovederne er imid-



Figur 1 Forskellige brudmåder i triaxialforsøg

Figur 2 Skalaeffekt på tøjningsmålinger

lertid ru og forhindrer vandrette tøjninger i prøvens endeflader. Størrelsen af prøverne er ofte $3.5^{\circ} \times 7$ cm, men også større prøver har været anvendt.

I 1964 udvikledes det glatte trykhovede (Rowe og Barden), der består af en glasplade belagt med vekslende lag af siliconefedt og gummimembraner. De øvrige forsøgstyper på figur 1 blev herved mulige. Trykhovederne må have større diameter end prøven, da denne får større diameter under forsøget. Højde-breddeforholdet H/D kan reduceres til 1, uden at den målte styrke stiger, men indflydelsen af trykhovederne kan dog spores, når $H/D < 0.7$. (Bishop 1965, Moust Jacobsen 1970). Trykhovederne er så glatte, at selv en lille skævhed i prøven får denne til at glide sidelæns, og sådanne forsøg må kasseres. Måling af spændinger og tøjninger er samtidig blevet væsentligt forbedret ved at flytte målingerne ind i triaxialcellen, således at man må antage, at apparatudviklingen er afsluttet.

Tilbage står en vurdering af, hvordan triaxialforsøgene skal tolkes og anvendes, samt hvilke prøvedimensioner, der er mest hensigtsmæssige.

2. PRØVENS SPÆNDINGS- OG TØJNINGSFORHOLD

Ved tolkningen af triaxialforsøgene forudsættes homogen spændingstilstand i prøven, hvorved en brudbetingelse kan benyttes direkte. En homogen spændingstilstand forudsætter imidlertid, at forskydningsspændingerne er lige store i snit, der står vinkelret på hinanden. Da de lodrette sider er forskydningsfri, må de vandrette flader også være det.

2.1 Ru kontra glatte trykhoveder

I forsøg med *ru trykhoveder* er ovennævnte statiske betingelse ikke opfyldt og en brudbetingelse kan strengt taget ikke bruges direkte, men en brudfigur med stive legemer ved trykhovederne burde gennemregnes. Benyttes en brudbetingelse alligevel, vil man måle for høje brudværdier, fordi de ru trykhoveder forstærker prøvens endeflader (Bishop 1965).

Forsøg med *glatte trykhoveder* opfylder ovennævnte elementære statiske betingelse. Såfremt prøvehøjden er stor nok, vil en skrå brudflade dog udvikles. Heri vil tøjningerne udvik-

le sig anderledes end i prøvens øvrige dele. Den inhomogene tøjningstilstand kan give så inhomogene styrkeforhold i prøven, at prøvens styrke undervurderes.

Det er nødvendigt at undersøge, hvor mange lag gummi der skal benyttes i glidefladen for at give minimum af brudværdi. Der er derfor udført forsøg med 4 kammertryk og 4 glideflade-tykkelser. Minimum indtræder ved en tykkelse t på 1.2 mm svarende til 4 membraner. Hvis $t < 1$ mm bliver prøven tøndeformet i brud, hvis $t > 2$ mm derimod timeglasformet.

2.2 Skrå brudflade i udrænede forsøg

Virkningen af den skrå brudflade er særlig udtalt for udrænede forsøg på forbelastet ler. I brudfladen stiger vandindholdet kraftigt i brud, idet vandet strømmer hertil fra de tilstødende dele af prøven. Forsøget betragtes som udrænet, fordi den ydre måling udviser, at der ikke sker ændringer i prøvens samlede volumen. Den målte brudværdi, der svarer til det forøgede vandindhold i brudfladen, kan ved brug af ru trykhoveder falde til under 25% af den korrekte værdi! (Moust Jacobsen 1967). En lignende virkning af den skrå brudflade kan findes, såfremt man udfører udrænede forsøg på tætlejret sand.

2.3 Homogene tilstande

Såfremt højde-breddeforholdet reduceres fra 2 til 1 undgås den skrå brudflade, således at såvel spændings- som tøjningstilstanden kan blive homogen. Det kan observeres i forsøgene, idet prøven bevarer sin cylindriske form, i det mindste til brud er opnået og ofte endda ved væsentlig større tøjninger. Så længe prøven er cylindrisk, må det således være korrekt at anvende [brudbetingelsen direkte](#).

3. SANDPRØVER

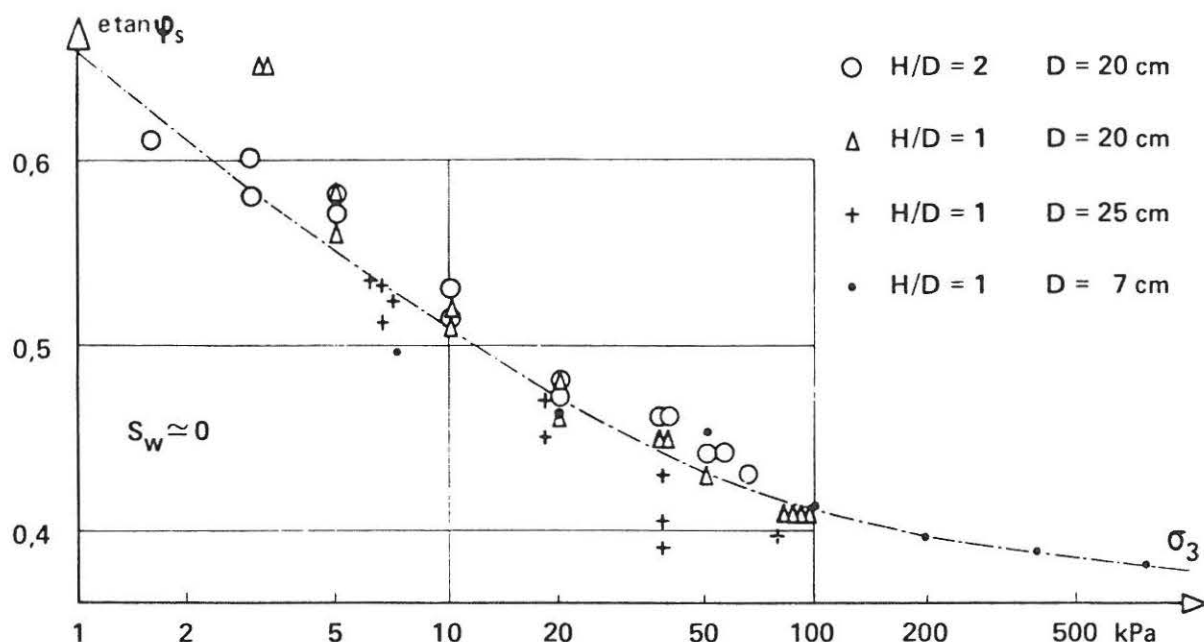
3.1 Prøvematerialet

De fleste af de triaxialforsøg, der omtales i denne artikel er udført med blokhussand, der er en strandsand med et lille saltindhold (6.5 mg Cl^- pr. kg sand). I dette afsnit omtales forsøg med fast lejrings ($e \cong 0.55 - 0.60$). Kornkurven er vist på figur 7 sammen med kornkurver for de øvrige omtalte sandsorter.

Prøverne er ikke intakte, men sandet er tørret og prøven er inddrysset til det ønskede poretal. De fleste af de forsøg, der er omtalt i dette afsnit, er udført på tørre prøver, fordi total vandmætning efter udlejrings er vanskelig (afsnit 3.4). Hvor intet andet er bemærket, er forsøgene udført som konsoliderede, drænede triaxialforsøg.

3.2 Prøvens størrelse

Der er udført forsøg med prøvediametrene 7, 20 og 25 cm og $H/D = 1$ og 2, for at undersøge om prøvens størrelse har indflydelse på resultatet (skalaeffekt).



Figur 3 46 drænedede triaxialforsøg med tørre prøver ($e \approx 0.57$)

Det viser sig, at der er en tydelig skalaeffekt på deformationsmålingen. På figur 2 er således vist den målte lodrette tøjning ϵ_1 , svarende til halv brudlast. ϵ_1 er korrigeret for sandkornenes indtrængen i glidefladen. Skalaeffekten er så betydelig, at der formentlig må udføres forsøg med endnu større prøver, såfremt sætninger på sand skal beregnes.

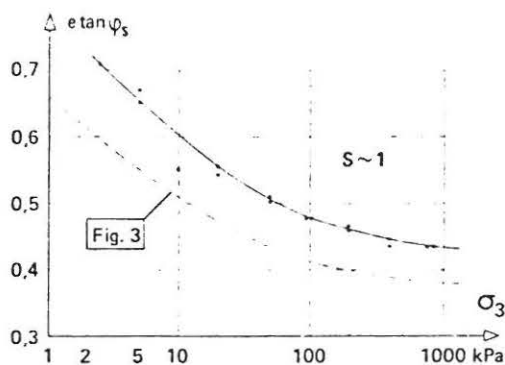
Derimod er der ikke nogen målelig indflydelse af prøvestørrelsen på brudværdierne, således som det ses på figur 3. Der er taget hensyn til forskelle i poretal ved at udregne $e_{tan\phi_s}$ for hvert forsøg, idet den skal være konstant for en given sandsort ifølge Kerisel. ϕ_s er sekantfriktionsvinklen, der defineres af

$$\sin\phi_s = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} \quad (1)$$

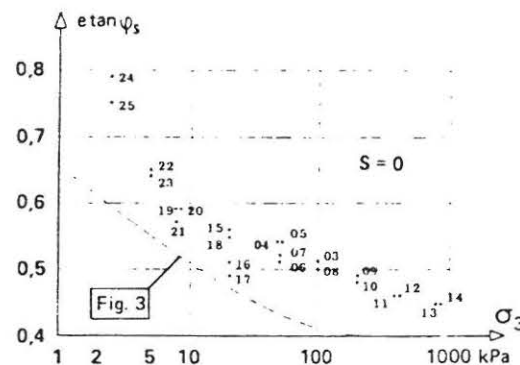
hvor σ_1 og σ_3 er brudværdier. Modelforsøg i DIA's centrifuge tyder på, at der heller ikke vil være markante skalaeffekter på brudværdierne, såfremt prøvedimensionen sættes yderligere ned (S. Normann Christensen 1977).

3.3 Højde-breddeforholdet i drænedede forsøg

Højde-breddeforholdet H/D 's indflydelse er undersøgt ved at udføre forsøg med $H/D = 1$ og 2 og $D = 20$ cm. Den skrå brudflade, der udvikles når $H/D = 2$ har øjensynlig ikke nogen målelig indflydelse på fast lejring, således som det også fremgår af figur 3, formentlig fordi den udvikles, efter at brud er indtruffet. Den skrå brudflade har muligvis indflydelse på løse lejringers brudværdier, men forsøgsmaterialet er for beskedent til at være konklusivt.



Figur 4 Vandmættede sandprøver ($e \approx 0.59$)



Figur 5 Nyt sand ($e \approx 0.55$)

3.4 Mætningsgraden

De danske sandsorter består af kvartskorn, der er uelektriske og næppe har forskellige styrker i våd og tør tilstand. Derfor bør også helt vandmættede og helt tørre sandprøver have samme styrkeegenskaber ved samme poretal.

Imidlertid er det meget vanskeligt at vandmætte sandprøver fuldstændigt. Mætningsgraden vil som regel ligge i intervallet 0.95 - 0.99 og de luftfyldte områder kan have indflydelse på brudværdierne, der da vil blive for høje. På figur 4 ses resultater med $7^\circ \times 7$ cm prøver af blokhussand med mætningsgraden $S_w = 0.9 - 1.00$. Det ses, at der er en bemærkelsesværdig stor forskel på næsten tørre og næsten vandmættede prøver, og at det er meget på den usikre side at udføre forsøg med vandmættede prøver! I artiklen om sands styrke ved NGM 75 blev dette forhold tolket som skalaeffekt, fordi $7^\circ \times 7$ cm vandmættede prøver blev sammenlignet med $20^\circ \times 20$ og $20^\circ \times 40$ cm tørre prøver.

De forsøg, der er omtalt tidligere i denne artikel, er alle udført med næsten tørre prøver der har et vandindhold mellem 0.5 og 1 $\frac{0}{100}$. Det er målt, at såfremt vandindholdet bliver mindre end 0.3 $\frac{0}{100}$, falder styrken yderligere (Bønding 1973). Det har dog kun teoretisk interesse. Sandet i naturen vil nemlig aldrig blive så tørt.

3.5 Gentagen brug af prøvematerialet

Der kan være mange grunde til at benytte det samme prøvemateriale mange gange. Der kan være for lidt materiale til rådighed, eller man ønsker at nedbringe forsøgsspredningen så meget som muligt. I sådanne tilfælde må man være opmærksom på, at sandet nedslides, og at virkningen kan erkendes fra gang til gang. På figur 5 angiver små tal den rækkefølge, som forsøgene er udført i. Sammenlignes forsøg med ens σ_3 ses en faldende tendens i $e \tan \phi_s$.

Kurven, der stammer fra figur 3, angiver $e \tan \phi_s$ for den samme sand, men kraftig nedslidt, idet den har været anvendt mange gange til triaxialforsøg og modelforsøg med plader. Dette sand er herved blevet så nedslidt (afrundede korn), at der ikke kan konstateres yderligere nedslidning på trods af, at der har været udført en speciel forsøgsserie som kontrol. Heraf

sluttes, at nedslidningen er størst i begyndelsen af en forsøgsserie og ophører, når sandkornenes spidser er slidt af.

Ved sammenligning mellem nyt sand og nedslidt sand ses endvidere, at det nye sand har større volumenændringer og lodrette tøjninger end nedslidt sand.

3.6 Bedst mulige forsøg

Undersøgelserne viser således

at forsøgene bør udføres på nyt materiale hver gang, såfremt man ønsker at bestemme en given sands aktuelle styrke,

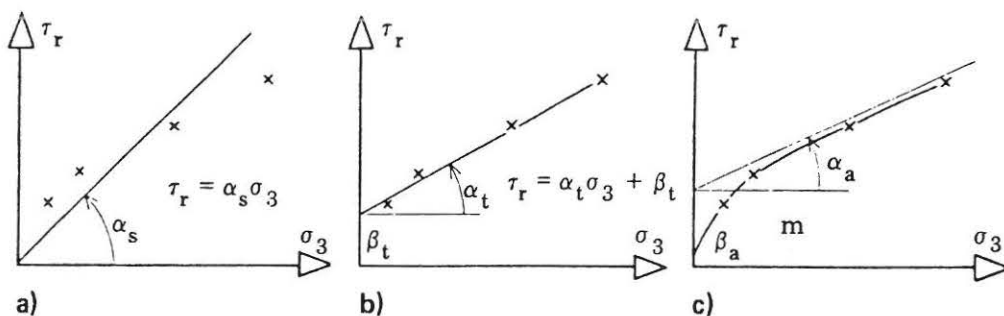
at forsøgene bør udføres på tørre prøver, fordi det er svært at opnå total vandmætning. Hvis $S \sim 0.95 - 0.99$ måles for høje styrker.

at forsøgene bør udføres med glatte trykhoveder og $H = D$ for at opnå homogene spændings- og tøjningstilstande.

at forsøg med $D > 500d_{50}$ ikke udviser skalaeffekter på brudværdien. Grænsen er formentlig noget lavere, fx $100d_{50}$, men det har undersøgelsen ikke afklaret.

4. VURDERING AF DRÆNEDE FORSØG PÅ SAND

Resultaterne fra et triaxialforsøg kan optegnes i et diagram, hvor kammertrykket σ_3 er abscisse og det halve stempeltryk $\tau_r = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)$ er ordinat. τ_r er radius i Mohrs cirkel.



Figur 6 Tolkning af triaxialforsøg

Herefter kan resultatet tolkes på forskellig måde, således som det er vist i figur 6, hvor de samme fire resultater vurderes på forskellig måde.

Forsøgsresultatet tolkes som om sand er kohæsionsløst (a). Der bestemmes den såkaldte sekantfriktionsvinkel φ_s af Coulombs brudbetingelse

$$\tau = \sigma \tan \varphi_s \quad \text{eller} \quad \tau_r = \frac{\sin \varphi_s}{1 - \sin \varphi_s} \sigma_3 = \alpha_s \sigma_3 \quad (2)$$

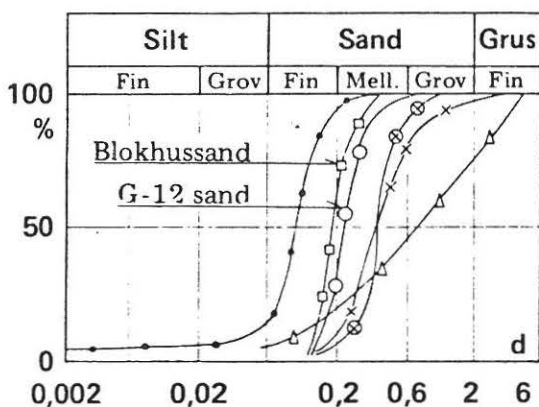
Der kan udregnes en værdi af φ_s pr. forsøg, således som det er gjort i det foregående. Figur 3 - 5 viser imidlertid at φ_s aftager med voksende spændingsniveau, og der må derfor i praksis vælges en rimelig og sikker værdi af φ_s .

Forsøgsresultatet kan mere nøjagtigt tolkes som om sand også var i besiddelse af kohæsion (b). Styrkeparametrene benævnes c_t og φ_t (t for tangent) og Coulombs brudbetingelse kan skrives

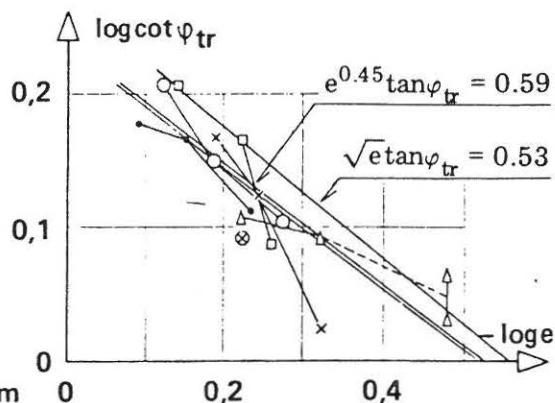
$$\tau = \sigma \tan \varphi_t + c_t \quad \text{eller} \quad \tau_r = \frac{\sin \varphi_t}{1 - \sin \varphi_t} (\sigma_3 + c_t \cot \varphi_t) = \frac{\sin \varphi_t}{1 - \sin \varphi_t} \sigma_3 \left(1 + \frac{c_t \cot \varphi_t}{\sigma_3}\right) \quad (3)$$

c_t omtales normalt som tilsyneladende kohæsion, fordi sand ikke har nogen egentlig kohæsion der kan mobiliseres, såfremt normalspændingen er nul.

Den friktionsvinkel φ_{tr} , man benytter i praksis, er da φ_s eller eventuelt φ_t , idet man da ser bort fra den tilsyneladende kohæsion c_t .



Figur 7 Det anvendte sandmateriale



Figur 8 φ som funktion af e

Der er udført triaxiale forsøgsserier på vandmættede prøver på en række forskellige sandsorter, hvis kornkurve er vist på figur 7. φ_t er målt og afsat som funktion af e i figur 8, der repræsenterer mellem 200 og 300 forsøg. Såfremt punkterne for en sandsort ligger på en ret linie, der har hældning - 1, gælder Kerisels formel $e \tan \varphi_t = \text{konstant}$ for denne sand. Det ses at være en god tilnærmelse for velsorteret sand, som G-12 sand og blokhussand, men passer ikke for en velgraderet sand.

Afbildningen viser iøvrigt, at φ_t i det væsentlige er en funktion af poretallet. Benyttes hele materialet under et, kan den bedste rette linie findes statistisk. Den er vist med dobbeltstreg. Et forsigtigt skøn over forsøgsmaterialet fører til formel (4). Heri er indregnet at prøverne er vandmættede. For nedslidt sand (afrundede korn) må konstanten reduceres med ca. 10%.

$$\sqrt{e} \tan \varphi_{tr} = 0.53 \quad (4)$$

Denne formel kan anvendes som et første skøn over φ_{tr} , og passer lige så godt som andre og mere indviklede skønsformler.

En mere tilfredsstillende tolkning af forsøgsresultatet fås ved at tage hensyn til spændingsniveauets indflydelse (c) ved at udvide Coulombs brudbetingelse med endnu en parameter m:

$$\tau_r = \frac{\sin \varphi_a}{1 - \sin \varphi_a} \sigma_3 \left(1 + \frac{c_a \cot \varphi_a}{m \sigma_3} \right)^m \quad (5)$$

hvor φ_a og c_a er asymptotiske parametre. Formlen har været omtalt tidligere (Moust Jacobsen 1970, 1975). m ligger mellem 0 og 1. For $m = 0$ fås et rent friktionsmateriale, for $m = 1$ fås et kohæsivt friktionsmateriale, der opfylder Coulombs lov.

Forsøgsmaterialet er vurderet ud fra formel (5), og karakteristiske størrelser angivet i tabel 1.

Tabel 1 Analyse af drænedede triaxialforsøg på Blokhussand

	S_w	e	$e \tan \varphi_a$	m	c_a	Figur no
Slidt sand	~0	0.57	0.38	0.2	13 kPa	3
Slidt sand	~0	0.67	0.38	0.2	8	
Slidt sand	~0.97	0.60	0.43	0.2	18	4
Slidt sand	~0.94	0.72	0.42	0.2	71	
Nyt sand	~0	0.55	0.44	0.2	48	5

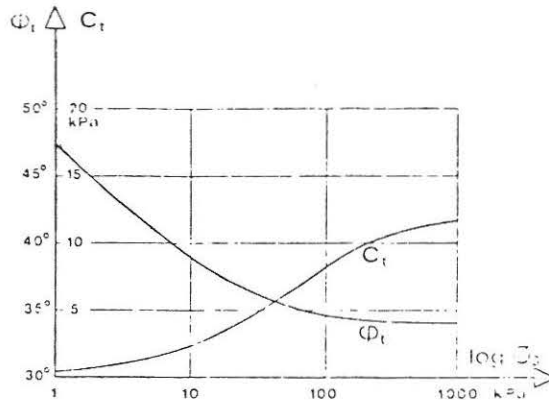
I analysen er det første resultat fundet ved statistisk udjævning af $e \tan \varphi_a$, m og c_a . For at opnå en sammenligning med de øvrige resultater er m i de efterfølgende udjævninger tillagt værdien 0.2.

Sammenlignes forsøgene med $S_w = 0$ og $e \cong 0.56$, ses det at nedslidning af sandkorn reducerer $\tan \varphi_a$ med ca. 15%, medens c_a reduceres til ca. en trediedel. Tilsvarende ses, at forsøg med næsten vandmættede prøver overvurderer $e \tan \varphi_a$ med ca. 15% og c_a med meget mere.

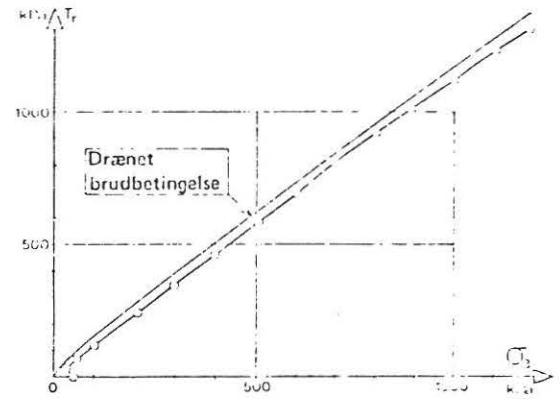
Såfremt man skal vurdere sands styrke på grundlag af forsøg med delvis vandmættede prøver, er det bedste man kan gøre at se bort fra c_t -leddet som før omtalt. Den eventuelle lille ekstra sikkerhed, som opnås herved, ophæves formentlig af en overvurdering af $\tan \varphi_t$.

5. TOLKNING AF MODELFORSG

Mange vanskelige problemer har i tidens løb fundet sin første løsning gennem udførelse af modelforsøg. Man har imidlertid oftest overset virkningen af spændingsniveauet, der i følge



Figur 9 c_t og φ_t som funktion af σ_3



Figur 10 Udrænet sandforsøg

(5) er meget væsentlig, se figur 9. Derfor må man i dag enten udføre forsøg i centrifuge eller i sædvanlige modelbokse med så stor overfladelast, at spændingerne bringes op på realistiske niveauer. Det sidste gøres på Aalborg Universitetscenters funderingslaboratorium, og det betyder at γ -leddet i en formel ikke kan undersøges.

Modelforsøg med stor overfladelast vil derfor sammenlignet med konventionelle modelforsøg ved små spændingsniveauer tilsyneladende undervurdere jordens styrke. Således er fundet, at gennemlokning kan beregnes ved at antage trykspredning 1:4 gennem det øvre bæredygtige lag i stedet for 1:2, som man normalt anvender. Små pladebelastningsforsøg på en ubelastet jordoverflade in situ vil af samme grund undervurdere bæreevnen. Konventionelle modelforsøg opfylder iøvrigt ikke modellovene.

Ved en sammenligning mellem modelforsøg, triaxialforsøg og beregningsmetoder, må spændingsniveauet tages i betragtning, fx efter formel (5). Da tørt sand rent faktisk har en vis c_a -værdi må den tages med i regning. Endvidere skal anvendes nedslidt sand for at undgå at svækkelse af nyt sand påvirker forsøgsresultaterne.

6. VURDERING AF UDRÆNEDE FORSØG PÅ SAND

Såfremt der udføres udrænedede forsøg på sand med måling af poretryksudviklingen opnås resultater, der ser ud som vist på figur 10. Spændingskurven forløber på et langt stykke på en ret linie, der tilnærmelsesvis går gennem (0,0), og som ligger inden for brudværdierne for de drænedede forsøg. Tolkes denne rette linie som brudbetingelsen kan bestemmes en værdi af φ_t , der er næsten korrekt, medens c_t måles til 0. Man kan altså på grund af bare eet triaxialforsøg opnå en for praktiske formål brugbar friktionsvinkel.

Det er dog ikke en reel brudbetingelse, der måles. Dertil er tøjningerne alt for små. Således er tøjningen i forsøget i figur 10 0.5%, når »brudbetingelsen» nås, og 8% ved forsøgets afslutning.

KONKLUSION

Ved analyse af et meget stort antal triaxialforsøg er fundet at prøvens højde-breddeforhold bør være 1 og at der bør anvendes glatte trykhoveder. Såfremt sands styrke skal bestemmes, kan anvendes prøver med $H \times D = 7 \times 7^\circ$ eller endda mindre. Måling af sands deformations-egenskaber kræver langt større prøver.

Til praktiske formål bestemmes tangentparametrene (figur 6) og der ses bort fra den tilsyneladende kohæsion c_t . Har man ikke triaxialforsøg til rådighed kan anvendes en skønsformel: $\sqrt{e} \tan \phi = 0.53$, der næsten altid er på den sikre side. Det må dog pointeres, at denne formel ikke nødvendigvis stemmer med ældre forsøgsresultater, og at det almindelige erfaringsgrundlag må tages op til nyvurdering, såfremt man går over til den her omtalte forsøgstype.

Såfremt triaxialforsøgene anvendes til videnskabelige formål, må spændingsniveauets indflydelse tages i regning fx ved anvendelse af formel (5). Der bør anvendes tørre prøver, og den faktisk forekommende værdi af c_a medregnes. Indflydelsen af sandets nedslidning må vurderes nøje.

REFERENCER

- Bishop, A. W. and Green, G. E. (1965): The influence of end restraint on the compression strength of a cohesionless soil. *Geotechnique* 1965, Vol. 15 (3), 243-266.
- Bønding, Niels (1973): Treakset brudtilstand i sand. Afhandling. DTH.
- Christensen, S. Norman (1977): Skalaeffekter i geostatiske modelforsøg med sand. Afhandling DTH.
- Denver, Hans (1974): The weakening effect on model sand during model tests and triaxial tests. DGI int. rapp.
- Hansen, J. Brinch (1966): Stress-strain relationships for sand. DGI bull. no 20.
- Jacobsen, H. Moust (1967): The undrained shear strength of preconsolidated boulder clay. *Proc. Eur. Congr. Soil Mech.* Vol. I, p. 119, Oslo.
- Jacobsen, H. Moust (1970): Strength and deformation properties of preconsolidated moraine clay. DGI bull. no 27.
- Jacobsen, H. Moust, Christensen, Knud V., Sørensen, Carsten S. (1977): Gennemlokning af tynde sandlag. *Väg- och vatten byggaren*, no 8 - 9.
- Jacobsen, H. Moust, Jørgensen, Mogens Bitsch, Poulsen, H. Serup (1975): Sands styrke. *Nordisk geoteknikermøde 1975*. pp. 57 - 59.
- Rowe, P. W. and Barden, L. (1964): Importance of free ends in triaxial testing. *Proc. ASCE* Vol. 96, SM1, p. 1.
- Skempton, A. W. and Bjerrum, L. (1957): A contribution to the settlement analysis of foundations on clay. *Geotechnique*, Dec. 1957, Vol. VII, p. 168.